ÜBER

ENTSTEHUNG DES TONES IN LABIALPFEIFEN.

INAUGURAL-DISSERTATION

DER

HOHEN PHILOSOPHISCHEN FACULTÄT

DER

UNIVERSITÄT ROSTOCK

ZUR

ERLANGUNG DER DOCTORWÜRDE

VORGELEGT

VON

WILHELM FRIEDRICH

AUS OSTROWO.

LEIPZIG,

JOHANN AMBROSIUS BARTH.

1901.

Referent: Herr Prof. Dr. R. Wachsmuth.

Druck von Metzger & Wittig in Leipzig.

MEINEN ELTERN.

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41549202_0076

Eine Labialpfeife wird in bekannter Weise dadurch zum Tönen gebracht, dass durch eine der oberen Lippe gegenüberstehende enge Spalte ein blattförmiger Luftstrom über die Mundöffnung geblasen wird, und zwar hat der Grundton bei offener Pfeife eine Luftwelle von doppelter, bei gedeckter Pfeife eine solche von vierfacher Länge der Pfeifenröhre.

Für die Ursache des Tönens und seine Entstehungsweise giebt es verschiedene Erklärungsversuche: Nach der Meinung, wie sie Helmholtz in der ersten Ausgabe seiner Tonempfindungen[1]) ausspricht, entsteht an der Schneide der oberen Lippe durch den anblasenden Luftstrom ein Geräusch, von dem ein bestimmter Impuls durch die Resonanz des Pfeifenhohlraumes verstärkt und in einen Ton verwandelt wird.

Aehnliche Ansichten äussern auch Violle[2]) und Tyndall.[3])

Später, in den neueren Auflagen seines Werkes, giebt Helmholtz eine andere Erklärung.[4]) Er meint, wie eine aus einem Spaltbrenner brennende blattförmige Gasflamme durch einen gegen die Fläche treffenden Luftstrom fortgeweht werde, so auch der anblasende Luftstrom an der Mündung einer Orgelpfeife. „Die Folge davon ist, heisst es weiter, dass zur Zeit, wo die Oscillation der in der Pfeife enthaltenen Luftmasse die Luft durch die Enden der Pfeife eintreten macht, auch der blattförmige Luftstrom des Mundstückes nach innen geneigt wird, und nun seine ganze Luftmenge in das Innere der Pfeife treibt. Während der entgegengesetzten Schwingungsphase dagegen . . . wird auch das Luftblatt seine ganze Masse

1) H. Helmholtz, Lehre von den Tonempfindungen 8. p. 149. 1870.
2) J. Violle, Lehrbuch der Physik, Deutsche Ausgabe p. 122. 1893.
3) J. Tyndall, Der Schall p. 216. 1897.
4) H. v. Helmholtz, Lehre von den Tonempfindungen 5. p. 154. 1896.

nach aussen werfen.“ Seiner Ansicht nach pendelt also der blattförmige Luftstrom um die Schneide der Oberlippe hin und her.

Auch Hr. Wüllner[1]) vertritt die Annahme, dass durch die in der Pfeifenröhre erzeugten abwechselnden Verdichtungen und Verdünnungen der Luftstrom „an der Mundspalte eine hin- und hergehende Bewegung“ erhalte.

Zu einem ähnlichen Resultate gelangt bei den Untersuchungen von Lamellentönen Hr. Hensen.[2]) Er fand gleichfalls, dass der anblasende Luftstrom, „die Ortho-Lamelle“, im Munde der Pfeife pendelnde Schwingungen ausführt und schreibt die Ursache hiervon den Schwingungen der Welle, welche die Transversallamelle erzeugen, zu.

Seine letzten Veröffentlichungen in den Annalen der Physik gaben die Anregung zu vorliegender Arbeit. Auch möchte ich dankbar erwähnen, dass Hr. Professor Hensen in liebenswürdiger Weise sein Interesse an dem weiteren Ausbau der Untersuchungen ausgesprochen hat.

Von einer anderen Seite war bereits früher Wilhelm Weber[3]) an die Frage herangetreten. Er ging von den Zuständen aus, die eine vor die Pfeifenmündung gehaltene schwingende Stimmgabel hervorruft, wenn einer der Pfeifentöne auf dieselbe Resonanz giebt. In ähnlicher Weise teile auch der anblasende Luftstrom der in der Pfeifenröhre enthaltenen Luftsäule Stösse mit, indem er bei seinem Durchtritt durch die enge Spalte in Erzitterungen gerät. Weber bezweifelt indes die Behauptung Savart's, dass die Stösse des anblasenden Luftstromes in solchem Tacte erfolgen, dass sie eine Luftwelle von der erforderlichen Breite erzeugen. Seiner Ansicht nach können auch in sehr ungleichen Zeiträumen erfolgende Stösse eine stehende Schwingung in Röhren veranlassen, gleichwie ein die Saite zupfender Violinbogen nicht genau in dem Tacte zu stossen braucht, in welchem die Saite schwingt.

Gegen letzteres wäre an und für sich kaum etwas einzuwenden; auch durch nicht tactmässig erfolgende Stösse

1) A. Wüllner, Lehrbuch der Experimentalphysik **1.** p. 879. 1895.
2) V. Hensen, Ann. d. Physik **2.** p. 734. 1900.
3) W. Weber's Werke: **1.** Akustik, p. 166. 1892.

könnte eine Orgelpfeife einen Ton ergeben. Jedoch entspricht das thatsächliche Verhalten des anblasenden Luftstromes den Behauptungen Savarts, wie ein im Nachstehenden beschriebener einfacher Versuch lehrt (vgl. Teil I).

Meine eigenen Untersuchungen befassen sich zunächst mit dem Verhalten des anblasenden Luftstromes (I.). Hierbei wird vor allem der Nachweis geführt, dass dieser nicht continuirlich fliesst, wie Hr. Hensen[1]) annimmt, sondern durch die Einwirkung der pulsirenden *T*-Lamelle auf ihn selbst pulsirt. Ferner zeigt sich, dass diese Pulsationen allein nicht genügen, um einen lauten Ton zu erzeugen. Es ergab sich die Notwendigkeit, die pulsirende Lamelle mit einer zweiten zusammentreffen zu lassen (II).

Die Entstehung des lauten Tones ist jedoch nicht auf die Pulsationen der *O*-Lamelle zurückzuführen. Denn es zeigte sich, dass bei diesen schwachen Pulsationen die *O*-Lamelle nicht selbsttönend war. Vielmehr konnte man diese als einen in erster Linie continuirlich verlaufenden Strom ansehen, der erst durch die kräftigen Stösse der *T*-Lamelle zum Tönen kam (II). Die Versuche der Tonerzeugung durch zwei Lamellen wurden vielfach modificirt.

Weitere Untersuchungen (III.) beschäftigten sich mit den Strömungen der Luft in der angeblasenen Röhre selbst. Man fand, dass durch die Mundöffnung sowohl Luft in die Röhre hineingezogen, wie wieder ausgestossen wird, entsprechend den Pendelungen der *O*-Lamelle. Die im Innern der Röhre auftretenden Wirbel lassen sich vollständig abfangen, ohne dass der Ton eine wesentliche Aenderung erleidet. Im Anschluss hieran lässt sich eine vollständige Erklärung der Vorgänge in der Pfeife selbst in allen ihren Modificationen geben.

I. Das Verhalten des anblasenden Luftstromes.

Für die Untersuchungen, die sich zunächst auf die Natur des anblasenden Luftstromes erstreckten, dienten hauptsächlich zwei Labialpfeifen von 62,5 bez. 250 cm Länge. Die Seitenwände derselben bestanden zur Beobachtung des Innen-

1) V. Hensen, l. c. p. 719. 1900.

raumes vollständig aus Glas. Ferner war bei der grösseren sowohl Schneide- als Gebläsespalte verstellbar.

Das Verhalten des Gebläsestromes wurde mit Hülfe eines König'schen Flammenmanometers untersucht. Dieses war, wie aus Fig. 1 ersichtlich ist, durch ein Rohrstück direct am Gebläsekopfe der Pfeife angeschlossen. Der Druck des Gebläsewindes konnte sich somit auf die Manometermembran fortpflanzen. Beim Anblasen zeigte die Gasflamme des Manometers durch lebhaftes Hüpfen im bewegten Spiegel, dass der Druck des anblasenden Luftstromes nicht continuirlich, sondern pulsirend war. Um den Tact dieser Pulsationen mit dem der in der Pfeife vorherrschenden Schwingungen zu vergleichen, wurde oberhalb dieser Flamme eine zweite Manometerflamme angeordnet, die durch ein Rohr mit dem Knotenpunkt der Pfeife in Verbindung stand. Die Bilder der beiden Flammen waren im rotirenden Spiegel nahe übereinander sichtbar. Beim Anblasen zeigten beide Flammen gleiche Perioden, ein Beweis, dass ihre Schwingungen mit gleichen Geschwindigkeiten erfolgten.

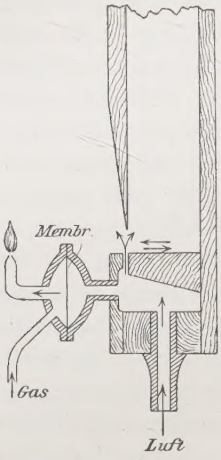

Fig. 1.

Bei mehreren auf gleiche Weise untersuchten Labialpfeifen zeigte sich dasselbe Verhalten des Luftstromes. Die Stösse waren mit Hülfe der Flamme auch dann noch nachweisbar, wenn das Manometer in einer Entfernung von 10 m vom Pfeifenkopfe an die Gebläseleitung angeschlossen wurde.

Die Pulsationen in dem anblasenden Luftstrome lassen sich auf einfache Weise erklären. Die an dem Boden der Pfeife anlangende Longitudinalwelle bildet sich dort, da sie durch die Mundöffnung einen seitlichen Weg findet, als Transversallamelle aus. Sie erhält bei einer Verdichtung eine Richtung nach aussen, bei einer Verdünnung eine solche nach innen. Diese T-Lamelle stösst bei Verdichtung senkrecht gegen die aus der engen Spalte strömende Ortho-Lamelle, sie beugt diese zunächst nach aussen und veranlasst dann gegen das Maximum ihrer Amplitude ein Anstauen derselben in der

Gebläsespalte. Die dadurch erzeugte Verdichtung pflanzt sich als Welle rückwärts in die Gebläseleitung fort und wirkt somit auch auf die Membran der Manometerflamme. Bei Verdünnung saugt die *T*-Lamelle die *O*-Lamelle in das Pfeifeninnere hinein, wodurch diese wieder freie Bahn gewinnt.

Im einzelnen wird im nächsten Abschnitt (II.) noch genauer gezeigt werden, dass überhaupt niemals ein continuirlicher Strom auf einen pulsirenden auftreffen kann, ohne dadurch selbst seine Continuität zu verlieren und an den Pulsationen Teil zu nehmen.

Die tactmässig erfolgenden Pulsationen der *O*-Lamelle hat auch Savart schon beobachtet. Er scheint hierauf seine Behauptung zu stützen, dass der Luftstrom schwach selbsttöne. Bei einer gewöhnlichen Orgelpfeife liesse sich dies wohl schwerlich feststellen. Dagegen wird der continuirliche Luftstrom des Gebläses durch die Zunge einer Zungenpfeife in so starke Pulsationen versetzt, dass er selbsttönend wird. Die Function dieser Zunge wird bei der Labialpfeife von der *T*-Lamelle ausgeübt, wobei die Anzahl der Schwingungen durch die Resonanz der Pfeifenröhre bestimmt wird. Obwohl Savart's Behauptung von dem Selbsttönen des anblasenden Luftstromes viel Wahrscheinlichkeit hat, so kann sie doch nur in beschränktem Maasse gelten. Denn im allgemeinen wird für das Anblasen der Pfeifen ein Luftstrom von geringem Luftdruck verwandt. Bei einem Winddrucke von 11—13 mm Wassersäule waren die Druckschwankungen in der *O*-Lamelle so gering, dass es nicht gelang, diese Pulsationen kymographisch aufzuzeichnen. Vielleicht lag freilich auch der Grund für den Misserfolg in dem Mangel einer geeigneten Membran. Jedoch gab ein einzelner Luftstrom von so geringem Winddruck auch dann keinen wahrnehmbaren Ton, wenn man ihn von vornherein durch mechanische Mittel pulsatorisch machte. Die Anordnung des Versuches ist durch Fig. 2 veranschaulicht.

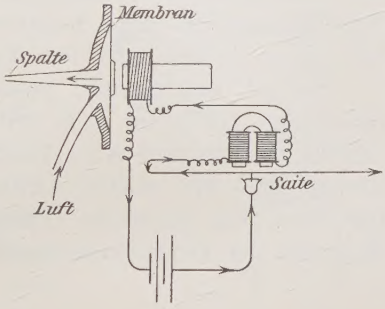

Fig. 2.

Ueber einen Hohlraum von grossem Durchmesser, aber geringem Rauminhalt war nach Art der Flammenmanometer eine Gummimembran ausgespannt. Diese wurde durch ein mitten aufgesetztes Eisenplättchen und einen durch intermittirenden Strom erregten Elektromagneten in Schwingungen versetzt. Der in den Hohlraum eingeleitete Wind eines Gebläses (von 10 bis 12 mm Wassersäule) konnte durch eine enge Spalte ausströmen. Die Unterbrechung des elektrischen Stromes besorgte in bekannter Weise eine Stahlsaite, welche von einem Hufeisenelektromagneten in Schwingung erhalten wurde. Die an ihrer Mitte befestigte Platinspitze spielte, wie aus der Figur ersichtlich, in einem Quecksilbernäpfchen. Der durch den Manometerraum fliessende Luftstrom wurde durch diese Schwingungen zu einem pulsirenden gemacht. Er gab jedoch bei seinem Austritt aus der engen Spalte keinen Ton.

Es soll damit nicht bewiesen sein, dass ein einfacher pulsirender Luftstrom nicht selbsttönend sein kann. Vielmehr beweist das Beispiel einer Zungenpfeife mit durchschlagender Zunge, dass ein solcher Luftstrom bei höherem Druck und besonders bei grösserer Differenz zwischen Maximum und Minimum der Druckschwankung einen Ton geben kann.

II. Das Verhalten der beiden Lamellen in der Mundöffnung.

Wir gehen jetzt von der Vorstellung aus, dass die *O*-Lamelle continuirlich anfängt, und erst die Schwingungen der *T*-Lamelle in ihr Stauungen derselben Periode hervorrufen, welche sich mithin rückwärts in der Gebläseleitung bemerkbar machen. Es war nun die Bedeutung der *T*-Lamelle für die Tonbildung näher zu prüfen.

Da bei dem Versuche nach Fig. 2 ein pulsirender Luftstrom von geringem Druck für sich keinen Ton gab, so musste wohl die Mitwirkung eines zweiten Luftstromes dazu erforderlich sein. Ein dementsprechend angeordneter Versuch konnte darüber Aufschluss geben. Liess man gegen den pulsirenden Luftstrom der letzten Versuchsanordnung senkrecht eine continuirliche Lamelle strömen, so entstand derselbe Ton, den die Unterbrechersaite angab. Der pulsirende Luftstrom hatte hier also die Wirkung der *T*-Lamelle. Sehr schön und deutlich

kam der Ton zu stande, wenn die continuirliche Lamelle durch eine blattförmige Gasflamme gebildet wurde. Die Flamme gab dann denselben Ton, wie die Saite des Unterbrechers. Den gleichen Erfolg erzielte man bei Umkehrung der Anordnung, wie sie in Fig. 3 dargestellt ist. Das Gas strömt durch den Raum des Membranmanometers, und senkrecht gegen die aus der engen Spalte pulsirend brennende Gasflamme war der continuirliche Luftstrom gerichtet. Auch hierbei war der Ton laut und kräftig. Man konnte bei pulsirender Gasflamme den Luftstrom auch ganz fehlen lassen, sobald man den Gasdruck so weit ermässigte, dass das Flämmchen aus der Spalte nur etwa 10 mm hoch brannte. Das freie Gasflämmchen gab dann den Ton der Unterbrechersaite wieder. Hierbei erzeugt sich das Flämmchen selbst die zweite Lamelle. Die beim Brennen stossweise nach oben entweichenden Verbrennungsgase saugen tactmässig neue Luft gegen die Flamme, wodurch abwechselnd Verdichtung und Verdünnung der Verbrennungsgase stattfindet. Das wäre aber eine Wirkung zweier pulsirender Lamellen aufeinander.

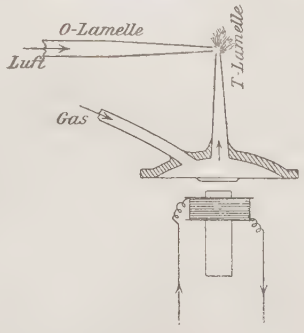

Fig. 3.

Die Erscheinung, dass ein solches frei brennendes Flämmchen durch tactmässige Schwingungen der Manometermembran zum Selbsttönen gebracht werden konnte, hatte sich zufällig bei den Versuchen herausgestellt. An der Mitte einer offenen Labialpfeife, also in der Nähe des Knotenpunktes, war ein Flammenmanometer angebracht. Während einer zufälligen schnellen Handbewegung, welche in der Nähe der Flamme eine Luftströmung verursachte, gab beim Tönen der Pfeife die Flamme den gleichen Ton. Jedenfalls vertrat die Luftbewegung die Stelle der *O*-Lamelle.

Weitere Untersuchungen nach dieser Richtung hin ergaben, dass auch das frei brennende Manometerflämmchen durch Schwingungen der Membran zum Tönen gebracht werden konnte, wenn man den Gasdruck sehr erniedrigte und die Brenneröffnung nicht zu eng gestaltete.

Das durch den Saitenunterbrecher in Schwingungen versetzte Manometerflämmchen gab jeden Ton wieder, den die Saite angab, auch jede Aenderung des Tones der Saite. Die Idee lag daher nahe, die Unterbrechungen durch ein Mikrophon statt durch eine Saite hervorzubringen. Wenn dies gelang, so hätte das Flämmchen jeden gesungenen, ja vielleicht auch gesprochenen Ton wiedergeben müssen. Allein nachdem mehrere dahingehende Versuche ohne Erfolg blieben, wurde keine weitere Zeit auf die Verfolgung dieser Idee verwandt, da sie für vorliegende Aufgabe belanglos war.

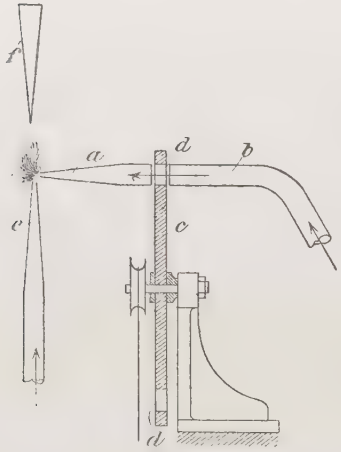

Fig. 4.

Durch den Versuch hatte sich ergeben, dass für die Entstehung eines Tones bei schwachem Luftstrom zwei zu einander senkrecht strömende Luftlamellen notwendig sind, von denen wenigstens eine pulsirend ist. Demnach mussten auch einzelne tactmässig erfolgende Luftstösse, die die Stelle der *T*-Lamelle vertraten, zu demselben Resultate führen. Für die Untersuchung dieses Falles wurde eine Anordnung verwandt, die durch Fig. 4 wiedergegeben ist. Gegenüber dem in eine enge Spalte ausmündenden Rohrstück *a* befand sich mit geringem Zwischenraum ein anderes Rohr *b* von gleichem Durchmesser, das an die Leitung des Gebläsewindes angeschlossen war. Zwischen den beiden Rohren wurde mit geringem Spielraum eine Scheibe *c* schnell gedreht; die Scheibe trug im Kreise angeordnete Durchbohrungen, die Ränder dieser Löcher waren abgegratet, damit der beim Blasen gegen die gedrehte Scheibe notwendig entstehende Ton möglichst wenig wahrnehmbar wurde. Die Scheibe selbst war so angeordnet, dass ihr Lochkreis den beiden Rohren gegenüberstand. Die ganze Anordnung bestand somit in einer Sirene, von der nur immer ein Loch in Thätigkeit trat. Liess man bei schnell rotirender Lochscheibe den Gebläsewind strömen, so erhielt man in gleichen

Zeitintervallen aus der Spalte austretende Stösse. Strömte nun senkrecht zur Richtung der letzteren eine continuirliche Luftlamelle durch das Rohr *e*, so liess sich ein leiser, weicher Ton vernehmen. Es spielte sich hier zwischen den beiden Lamellen ein ähnlicher Vorgang ab, wie am Munde einer Labialpfeife. Der continuirliche Luftstrom bildete die *O*-Lamelle, die im Tacte erfolgenden Stösse die *T*-Lamelle. Der auf diese Weise erzeugte Ton hörte sich leer an, es fehlte ihm die Resonanz.

Wurde in geringer Entfernung in den continuirlichen Strom eine Einlage *f* eingebracht, so wurde der Ton schärfer. Eine solche Einlage trägt wesentlich zur Verstärkung des Tones bei, ist jedoch nicht Bedingung für das Zustandekommen desselben.

Mit diesem Versuche war jedoch noch nicht das thatsächliche Verhalten der *T*-Lamelle in der Mundöffnung einer Pfeife wiedergegeben. Denn die *T*-Lamelle pendelt zwischen dem Maximum der Verdichtung und dem der Verdünnung. Hier waren nur einzelne Verdichtungsstösse, und auch schon durch diese konne ein Ton entstehen. Um nun die *T*-Lamelle ganz richtig zu erzeugen, wandte ich wiederum das mittels Elektromagneten in Schwingungen versetzte Membranmanometer an (vgl. Fig. 5), leitete jedoch keinen Luftstrom hinein, sondern verschloss die für diesen vorhandene Oeffnung. In der engen Spalte der Düse entstand somit bei den Schwingungen der Membran abwechselnd Verdichtung und Verdünnung, wie bei der *T*-Lamelle in der Mundöffnung der Pfeife. Bei senkrecht dagegen strömender *O*-Lamelle war an der Spalte der Ton der Unterbrechersaite vernehmbar, der wiederum durch eine Einlage in die *O*-Lamelle verstärkt werden konnte. Auch hier war der Erfolg erheblich grösser, wenn die *O*-Lamelle durch eine Gasflamme gebildet wurde.

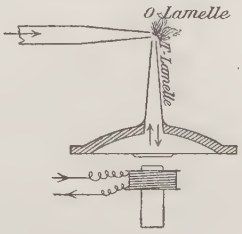

Fig. 5.

Sowohl bei diesem als bei dem vorigen Versuche konnte durch eine in die Gebläseleitung des continuirlichen Luftstromes eingeschaltete Manometerflamme die hier in gleicher Weise wie bei der Labialpfeife erfolgende Rückwirkung der

T-Lamelle auf die *O*-Lamelle sichtbar gemacht werden. Ein bewegter Spiegel zeigte das lebhafte Hüpfen des Manometerflämmchens. Die *T*-Lamelle erzeugte also auch hier stossweise Stauungen im anblasenden Luftstrom.

In ähnlicher Weise wie vorstehend durch eine continuirliche *O*-Lamelle und eine stossende oder schwingende *T*-Lamelle Töne erzeugt werden konnten, hat auch Hr. Hensen[1]) Töne erhalten, wenn er zwei continuirliche Luftlamellen senkrecht gegeneinander strömen liess.

Lassen sich also durch zwei Luftlamellen Töne erzeugen, wie aus obigen Versuchen hervorgeht, so kann die Ursache des Tones einer Labialpfeife auch nur in der Wechselwirkung der *O*-Lamelle und der *T*-Lamelle aufeinander beruhen. Die Erklärung, die die Entstehung des Tones auf Schneidengeräusche zurückführen will, ist demnach wohl zu verwerfen, wenngleich zugestanden werden muss, dass an der Schneide scharfe Töne oder Geräusche vorherrschend sind. Man kann die Schneide einer Labialpfeife abstumpfen, ja sie sogar ganz als Wulst ausbilden, — der Ton kommt zu stande.

Die Ausbildung einer scharfen Schneide erleichtert die Pendelungen der *O*-Lamelle, da diese um so geringer sein kann, je schärfer die Schneide ist. Ferner ermöglicht auch die Abschrägung der oberen Lippe ein bequemeres Vorbeiströmen der *O*-Lamelle und der von dieser mitgerissenen Luft. Es ist gleichgültig, ob der aus der engen Spalte tretende Luftstrom direct gegen die Schneide, oder ob er vor oder hinter derselben vorbeistreicht. Ist die *O*-Lamelle gegen die Schneide oder hinter derselben vorbei gerichtet, so wird die erste Welle eine Verdichtungswelle sein. Dagegen ist sie eine Verdünnungswelle, wenn die *O*-Lamelle an der Schneide vorn vorbeistreicht. Dies lässt sich dadurch leicht erklären, wenn man sich die von der Pfeife eingeschlossene Luftsäule als Schraubenfeder denkt. Es ist ganz gleichgültig, ob man die Feder, um sie in axiale Schwingungen zu versetzen, zuerst zusammendrückt und dann auseinanderschnellen lässt, oder ob man sie auseinanderzieht, um sie zusammenschnellen zu lassen. In gleicher Weise wird auch eine eingeschlossene Luftsäule pendelartige

1) V. Hensen, l. c. p. 727.

Schwingungen vollführen, gleichviel ob sie durch Verdichtung oder Verdünnung aus ihrem Gleichgewicht gebracht wird. — In der That kam in beiden Fällen der Ton zu stande, wenn man die an der grösseren der beiden Labialpfeifen angebrachte verstellbare Schneide einmal um etwa 4 mm vor, dann ebensoweit hinter die Strömungsrichtung der *O*-Lamelle einstellte.

Da nach den Versuchen die *O*-Lamelle einer tönenden Orgelpfeife pulsirend strömte, so musste der Ton sicherer zu stande kommen, wenn man den anblasenden Luftstrom von Haus aus in dem erforderlichen Tacte pulsirend machte. Um dies zu erreichen, wurde eine Seite des Gebläsekopfes an der Pfeife durch eine Gummimembran gebildet, die mit Eisenplättchen versehen wiederum von dem Saitenunterbrecher elektromagnetisch in Schwingungen versetzt wurde (Fig. 6). Die Saite des Unterbrechers liess sich nach Anblasen der Pfeife durch Schwebungen, die dabei auftraten, einstellen. Der Luftstrom wurde also nicht durch die schwingende *T*-Lamelle allein, sondern auch durch die Schwingungen der Membran pulsirend gestaltet. — Der Ton der Pfeife war kräftig und hielt sich auch bei stärkerem Winddruck, ohne in den Oberton überzugehen, was sonst bei stärkerem Anblasen bald eintrat. Da es hierbei auf die Dauer schwierig wurde, den Saitenunterbrecher auf gleicher Schwingungszahl zu erhalten, so wurde die Tonhöhe der Pfeife durch Veränderung der Mundbreite regulirt. Dies geschah meistens mittels Glaserkitt, der auf die Mundöffnung in schmälerem oder breiterem Streifen aufgeklebt wurde. Auch durch dieses Mittel liessen sich beliebig langsamere und schnellere Schwebungen erzeugen.

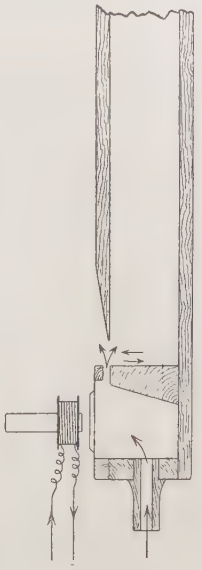

Fig. 6.

Die vorangegangenen Ergebnisse führten zu dem Schluss, dass, entsprechend dem durch Fig. 5 dargestellten Versuch, auch dann der Ton entstehen müsse, wenn statt eines pulsirenden Luftstromes die *O*-Lamelle durch Oscillationen, also durch abwechselnde Verdichtung und Verdünnung erzeugt würde.

Um hierbei recht kräftige Wirkungen zu erzielen, wurde der von der Membran am Gebläsekopf überdeckte Luftraum möglichst klein gemacht. Ferner wurde er allseitig so abgeschlossen, dass nur die enge Gebläsespalte nach der Mundöffnung hin für den Durchtritt der Luft frei blieb. Die Mem-

Fig. 7.

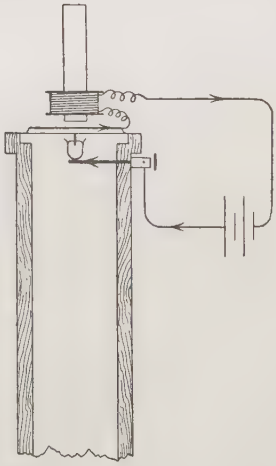

Fig. 8.

bran wurde durch den Saitenunterbrecher in Schwingungen versetzt. Der erzeugte Ton war nicht so kräftig als bei angeblasener Pfeife. Er kam auch erst dann rein zum Vorschein, als die Schwingungszahl der Saite mit der der Pfeife im Einklang stand. Die Resonanz liess sich auch hier durch Veränderung der Mundbreite reguliren. Der Ton kam hier so zu stande, dass die oscillirende *O*-Lamelle die Luftsäule in

der Pfeifenröhre zum Mitschwingen brachte. Gelang es, diese Schwingungen auf irgend einem anderen Wege mechanisch zu erzeugen, so musste die Pfeife in gleicher Weise einen Ton ergeben. Dies liess sich dadurch erreichen, dass man den Deckel einer Labialpfeife durch eine eisenbelegte Gummimembran ersetzte und diese in bekannter Weise mittels des Saitenunterbrechers zum Schwingen brachte (Fig. 7). Der so entstandene Ton war nicht so laut wie ein durch Anblasen erzeugter. — Die Unterbrechung des Stromes für den Elektromagneten musste sich auch durch die Membran selbst bewirken lassen. Diese wurde daher so gespannt, dass ihre eigene Schwingungszahl der Tonhöhe möglichst nahe kam. Nach unten war in der Mitte der Membran ein Platinstiftchen, das mit einem Draht verbunden war, so angebracht, dass es in einem innerhalb befindlichen, mit Quecksilber gefüllten Näpfchen spielen konnte (Fig. 8). Bei Einschaltung des Stromes wurde die Membran angezogen, wodurch Unterbrechung eintrat. Indem sich das Spiel der Stromunterbrechung durch die von der Resonanz der Pfeifenröhre beeinflusste Membran fortsetzte, kam ein Ton zu stande, der nur durch den elektrischen Strom erzeugt war. Die gesamte Anordnung bildete somit eine elektrische Orgelpfeife.

III. Untersuchung des secundären Luftstromes im Pfeifenraum.

Weitere Untersuchungen erstreckten sich auf die Wirbel, die beim Anblasen einer gewöhnlichen Labialpfeife in deren Innerem entstehen. Wie schon oben erwähnt, waren die beiden hauptsächlich benutzten Pfeifen von beiden Seiten völlig aus Glas, sodass sie eine bequeme Durchsicht gestatteten. Man konnte also versuchen, durch eingeblasenen Tabaksrauch einen Einblick in die Vorgänge zu erhalten. Während der Rauch sich in gedackter Pfeife längere Zeit hielt, war er bei offener Pfeife schon wenige Secunden nach dem Beginn des Anblasens hinausgefegt. Trotzdem genügte der kurze Zeitraum, um zu ersehen, dass das Verhalten der Wirbel bei offener Pfeife dem bei gedackter gleichkam. Einige ganz geringe Abweichungen waren für die Ergründung des Vorganges ohne Bedeutung. Das Bild der Wirbel im Innern der Pfeife wird in seiner

Hauptsache durch Fig. 9 wiedergegeben. An der Vorderwand zeigte sich eine Strömung aufwärts, an der Hinterwand eine entgegengesetzte abwärts. Am Boden der Pfeife ging eine Strömung der Luft von der Hinterwand nach vorn zu der Mundöffnung. Die Strömungen nach oben und unten hatten eine Ausdehnung, die etwa $^2/_5$ und mehr der Pfeifenlänge ausmachte. Der Raum der Pfeifenröhre, der zwischen den beiden Strömungen lag, war von einem regellosen Durcheinander von Wirbeln erfüllt, von denen der oberste am deutlichsten ausgebildet war. In dem oberhalb dieses Wirbels befindlichen Raume der Röhre war — wenigstens bei gedackter Pfeife —, keinerlei Strömung vorhanden.

Fig. 9.

Da die Zahl der Wirbel eine so grosse war, und sie schichtenweise gelagert ineinander übergingen, so hätte es fast scheinen können, als ob dieselben zu den Obertönen in irgend welchen Beziehungen ständen. Wenn es dann möglich wurde, die Wirbel ganz oder teilweise abzufangen, so durften sich auch bei verstärktem Winddruck keine Obertöne einstellen. Hierfür benutzte ich zunächst eine dünne Wand, bestehend in einem Holzbrettchen von kaum halber Pfeifenlänge. Diese Scheidewand wurde in der Mitte zwischen der vorderen und der hinteren Pfeifenwand parallel eingeschoben und dem Boden der Pfeife bis auf einige Centimeter genähert (vgl. Fig. 10). Eingebrachter Tabaksqualm erwies beim Anblasen der Pfeife, dass die Strömung nach oben an der Vorderwand bis zur Oberkante der Zwischenwand ging, dann eine Wendung über diese hinweg machte, um unter Wechsel der Richtung an der Hinterwand abwärts der Mundöffnung zuzuströmen. Die Obertöne waren nach wie vor zu vernehmen, und bei stärkerem Anblasen ging der Grundton in den ersten der Obertöne über. Die Wirbel mussten also anderer Natur sein, als erwartet war,

und konnten mit den Obertönen in gar keinem Zusammenhange stehen.

Durch vorstehenden Versuch war die Natur der Wirbel nicht klargelegt. Ich verwandte daher eine Zwischenwand von solcher Länge, dass sie unten bis auf 1 cm an den Boden — so hoch war etwa die Mundöffnung —, und oberhalb noch 8 cm über das Ende der Pfeife reichte, wie aus Fig. 11 ersichtlich ist. Nunmehr zeigte sich beim Anblasen ein seltsames Spiel. Die Strömung, durch Tabaksqualm sichtbar gemacht, ging an der Vorderwand aufwärts über das Ende der Pfeife hinaus, kehrte dann wieder über die Oberkante der Scheidewand hinweg um und vollendete an der Rückwand ihren Weg nach dem Boden. Sie machte einen in sich geschlossenen Kreislauf.

Fig. 10. Fig. 11.

Blies man nur eine einzige kurze, aber kräftige Wolke von Tabaksqualm gegen das obere Ende der Pfeife, so konnte man deutlich den Kreislauf der Strömung verfolgen. Die Wolke durchlief etwa 10—12 mal den Weg durch die Pfeife, indem sie immer dünner wurde und schliesslich ganz verschwand.

Auch die Anziehungskraft der strömenden *O*-Lamelle liess sich durch Tabaksrauch sichtbar machen. Blies man diesen von unten oder von der Seite gegen die Mundöffnung, doch so, dass er nur bis auf etwa 3 cm Entfernung an diese heranströmte, so wurde der Rauch ganz lebhaft gegen die Mundöffnung hingezogen; ein Teil strömte aussen an der oberen Lippe vorüber, während der andere Teil durch die Mundöffnung nach innen hineinfloss und hier den vorher beschriebenen Kreislauf um die Scheidewand machte. Sobald jedoch eine solche umkreisende Rauchwolke in die Nähe der Mundöffnung kam, so konnte man wahrnehmen, dass immer ein Teil der-

selben durch die Oeffnung nach aussen strömte, und hier durch die *O*-Lamelle an der oberen Lippe hochgetrieben wurde.

Es wird also sowohl Rauch von aussen durch die Mundöffnung teilweise nach innen geworfen, als auch innen befindlicher nach ausserhalb. Dies kann nur darin eine Erklärung finden, dass die *O*-Lamelle unter der Oberlippe hin- und herpendelt, und diese Pendelungen werden erzeugt durch die schwingende *T*-Lamelle.

Die Geschwindigkeit, mit der die Rauchwolken (und also auch die Luft) ihren Kreislauf in der Pfeife vollendeten, hing von dem Drucke des anblasenden Luftstromes ab.

Der gleiche Versuch mit der in das Innere der Pfeifenröhre eingeführten Scheidewand wurde auch mit gedackter Pfeife angestellt. Die Scheidewand war so lang gehalten, dass unten und oben ein Durchlass von 1 cm Höhe frei blieb. Der Kreislauf der strömenden Luft war der gleiche wie bei offener Pfeife; nur wurde gegen die Mundöffnung von aussen geblasener Tabaksrauch nicht mit gleicher Lebhaftigkeit angezogen und in das Innere geworfen.

Bei offener Pfeife beteiligt sich nicht die gesamte innen an der Vorderwand nach oben strömende Luftmasse an dem Rückwege des Kreislaufes. Ein Teil der Luftmasse strömt an der oberen Oeffnung ins Freie, und ein entsprechendes Quantum wird für den Rückweg an der Hinterwand durch Luft von aussen ersetzt. Diese verschiedenen Strömungen liessen sich gleichfalls bequem durch Tabaksrauch kenntlich machen.

Noch eine andere Erscheinung trat bei der offenen Pfeife zu Tage. Befand sich nämlich eine Rauchwolke in dem obersten Ende zwischen Hinter- und Scheidewand, so konnte man bei plötzlichem Anblasen deutlich erkennen, dass die Wolke erst einen kurzen Stoss nach aussen hin erhielt, dann aber seine Richtung umkehrte, um den gewöhnlichen Kreislauf zu machen. Das lässt sich nur dahin deuten, dass der erste Anstoss, den der anblasende Luftstrom gab, eine Verdichtung war, die die ganze Luftsäule, sowohl diejenige vor als hinter der Scheidewand, nach oben hin stiess. Bei genauerem Nachsehen ergab sich auch, dass die Ausströmungsspalte so stand, dass der Luftstrom hinter der oberen Lippe in das Pfeifeninnere hineinströmen musste.

Um das Verhalten der Luftströmungen dann zu beobachten, wenn die *O*-Lamelle ausserhalb der oberen Lippe vorbeistrich, wurde die Spalte ungefähr 2 mm vor dem Rande der Lippe angeordnet. Eine in den oberen Teil der Pfeife zwischen Vorder- und Scheidewand eingeblasene Rauchwolke zeigte durch ihr Verhalten an, dass der erste Anstoss diesmal in einer Verdünnungswelle bestand. Die Rauchwolke machte wiederum eine kurze Bewegung, jedoch nach unten hin, und ging dann nach Umkehr ihrer Bewegungsrichtung zum oberen Ende hinaus in dem oben beschriebenen Kreislauf weiter. — Die Zeit, die immer von dem ersten Anstoss bis zur Umkehr der Rauchwolke verstrich, betrug nach Schätzung etwa $^1/_4$ sec, lange genug, um den Vorgang mit blossem Auge zu verfolgen.

Bei der letzteren Stellung der Spalte, wo die Wirkung der *O*-Lamelle mehr eine saugende war, hatte der secundäre Kreislauf ein eigentümliches Verhalten. Bei schwachem Winddruck im Gebläse verlief die Strömung in der gewöhnlichen Weise an der Vorderwand aufwärts, an der Hinterwand abwärts. Bei einer Steigerung des Druckes trat bisweilen für kurze Augenblicke ein Stillstand der Strömung ein, dann aber wechselte diese gänzlich ihre Richtung, ging hinten aufwärts und vorn abwärts. Liess der Winddruck nach, so trat nach abermaligem, augenblicklichen Stillstand wieder der normale Verlauf der Strömung ein. Bei gedackter Pfeife hatte der Kreislauf ausschliesslich eine der gewöhnlichen entgegengesetzte Richtung.

Bei Betrachtung des Verhaltens der Strömungen ergiebt sich folgendes: Ist die Spalte normal angeordnet, also ziemlich gegenüber der Lippe, so findet an der Vorderwand eine Strömung nach oben und an der Hinterwand eine entgegengesetzt gerichtete, also nach unten statt. Bei eingeschobener Zwischenwand vollführen diese Strömungen einen in sich geschlossenen Kreislauf; beim Fehlen einer Zwischenwand bilden sich zwischen den Strömungen Wirbel. Die Entstehung der letzteren ist daher gänzlich auf Kosten der beiden einander entgegengesetzt gerichteten Strömungen zu setzen. Diese sind bestrebt, ihre Druckdifferenz gegenseitig auszugleichen, und zwar findet dies statt auf der ganzen Länge von der Mundöffnung, wo die *T*-Lamelle schwingt, bis an den obersten Haupt-

wirbel (vgl. Fig. 9). Oberhalb des letzteren sind die Luftmassen insoweit in Ruhe, als Strömungen, die sich auf Wirbel zurückführen liessen, nicht vorherrschen. Folglich braucht dort auch kein Ausgleich von Strömungen stattzufinden.

Je stärker der Druck des Gebläsewindes ist, um so grösser wird auch die Differenz zwischen der vorderen Verdichtungs- und der hinteren Verdünnungsströmung sein und um so schneller in gleicher Weise der Ausgleich dieser Differenz und das dadurch erzeugte Spiel der Wirbel. Der oberste Wirbel bleibt sowohl bei starkem als bei schwachem Winddruck fast immer an derselben Stelle, sein Entstehungsort hängt also wenig oder gar nicht vom Winddruck ab.

Abgesehen von diesen Strömungen der Luft in der Pfeifenröhre pflanzt sich innerhalb derselben die Welle des erzeugten Tones ungehindert fort, wie eine in diese Strömungen gehaltene Flamme im bewegten Spiegel erkennen lässt. Die *T*-Lamelle schwingt, wie die Versuche des Hrn. Hensen mit einer unter die Schneide gehaltenen Kerzenflamme bewiesen, infolge der abwechselnden Verdichtung und Verdünnung und versetzt dadurch die *O*-Lamelle in Oscillationen. Ist die Strömung der *O*-Lamelle in ihrem Hauptteil nach innen gerichtet, strömt sie also hinter der oberen Lippe vorüber, so erzeugt sie eine Verdichtungswelle, die, nachdem sie oben reflectirt ist, unten wiederum als *T*-Lamelle nach aussen stösst. Strömt die *O*-Lamelle dagegen vorn an der Oberlippe vorüber, so wird dadurch hauptsächlich Verdünnung erzeugt. Die *T*-Lamelle schwingt stärker nach innen als reflectirte Verdünnungswelle und lässt dadurch den secundären Stromkreis in einer der normalen entgegengesetzten Richtung verlaufen.

Die starke Ausbildung der *T*-Lamelle ist eine Grundbedingung für die Entstehung und das Fortbestehen des Tones. Sucht man die Bildung der *T*-Lamelle zu beeinträchtigen, z. B. durch eine Art Wehr, eine Platte von der Breite der Pfeife und geringer Höhe, die man auf den Boden der Pfeife aufsetzt, so wird auch die Stärke des Tones dadurch vermindert. Nähert man das Wehr bis zu $^1/_3$ der Pfeifentiefe der Mundöffnung, so wird die *T*-Lamelle so schwach, dass kein Ton mehr zu stande kommt. Gerade der Umstand, dass die am Boden auftreffende Welle, mag sie verdichtend oder

verdünnend sein, durch die seitliche Mundöffnung als *T*-Lamelle einen Weg sucht und hierbei die *O*-Lamelle zu tactmässigen Pulsationen bringt, ist die Ursache, dass zwischen den beiden Lamellen ein Gleichgewichtszustand, ein einfaches Vorbei- oder Hineinblasen nicht eintreten kann. Wesentlich ist die zweckentsprechende Anordnung der mitwirkenden Factoren, also Druck und Richtung des Luftstromes, und Stellung der oberen Lippe gegenüber diesem. Zuerst muss eine erst das Gleichgewicht der Luftsäule störende Welle zu stande kommen können, dann wird diese in dauernder Schwingung erhalten. Letzteres ist für den Ton von besonderer Wichtigkeit. Denn wie die elektrische Orgelpfeife beweist, sind die Schwingungen der Luftsäule allein, auch ohne *O*-Lamelle, im stande, ein Tönen zu erzeugen.

Vorstehende Arbeit ist auf Veranlassung und unter Leitung des Hrn. Prof. Dr. Wachsmuth im physikalischen Institut der Universität Rostock ausgeführt. Es ist mir eine angenehme Pflicht, an dieser Stelle genanntem Herrn für die Anregung zu dieser Arbeit und für seine wertvollen Ratschläge meinen aufrichtigsten Dank auszusprechen. — Auch dem Director des physikalischen Instituts, Hrn. Prof. Dr. Matthiessen, danke ich für das meiner Arbeit entgegengebrachte Interesse.